

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ І ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Контрольні запитання, розрахункові завдання

і методичні вказівки з дисципліни

«Електричні машини»

для студентів спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

За редакцією проф. Мілих В.І.

Харків

2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНСФОРМАТОРІВ І ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Контрольні запитання, розрахункові завдання
і методичні вказівки з дисципліни
«Електричні машини»
для студентів спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

За редакцією проф. Мілих В.І.

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХП»,
протокол № 1 від 16.01.2019 р.

Харків
НТУ «ХП»
2019

Розрахунок характеристик трансформаторів і електричних машин. Контрольні запитання, розрахункові завдання і методичні вказівки з дисципліни «Електричні машини» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад. В.В. Шевченко, О.Ю. Юр'єва, А.В. Єгоров ; за ред. В.І. Мілих – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 32 с.

Укладачі В.В. Шевченко,
 О.Ю. Юр'єва,
 А.В. Єгоров

Рецензент С.Ф. Артюх

Кафедра електричних машин

ВСТУП

Методичне видання присвячено виконанню розрахункового завдання з дисципліни «Електричні машини» за темою «Розрахунок характеристик трансформаторів і електричних машин».

Метою роботи є закріплення теоретичних знань і відпрацювання практичних навичок розрахунку характеристик трансформаторів та електричних машин змінного та постійного струму. Тобто об'єктами дослідження є класичні електротехнічні пристрої – трансформатори та електричні машини, які є основою електроенергетики та електропривода різних виробництв.

Предметом вивчення даного курсу є електричні машини, які використовують на практиці для перетворення одного виду енергії в інший, зокрема, механічної на електричну (генератори), або електричної на механічну (двигуни), і трансформатори, які використовують для перетворення параметрів змінних струму і напруги.

В результаті виконання цих завдань студент повинен знати типи, конструкції, основні складові елементи, принцип дії, характеристики трансформаторів та електричних машин, особливості їх пуску, знати, як регулювати частоту обертання і як здійснюється гальмування; вміти аргументовано вибирати потужність, тип трансформатора або електричної машини. Студент повинен вміти оцінювати технічний стан електричних машин і трансформаторів, вміти оцінювати нові серії електрообладнання та враховувати не тільки технічні, але й економічні вимоги.

У цьому виданні наведено п'ять завдань з п'яти розділів дисципліни. В кожному розділі сформульовані контрольні питання та варіанти вихідних даних до задач, а також методичні вказівки щодо їх розв'язання. Конкретний обсяг робіт уточнює викладач, який веде курс лекцій з вказаної дисципліни.

Розрахункові завдання є підсумковим документом роботи студента з дисципліни. До іспиту звіт повинен бути повністю оформлений і захищений. У кінці звіту наводиться список джерел інформації, яку студент використовував у процесі роботи. Схеми і графіки слід будувати на міліметровому папері з позначенням на осях стандартних літерних позначень величин і одиниць вимірювання. Варіант завдання вибирають за двома останніми цифрами залікової книжки або за номером у списку журналу академічної групи.

Звіт про розрахункову роботу повинен бути акуратно оформленим. Він починається з титульного листа, зразок оформлення якого наведено в додатку А. При оформленні звіту треба наводити постановку завдання, вказувати вхідні числові дані, необхідні схеми, порядок проведення розрахунків в літерному, а потім в числовому вигляді, додавати необхідні схеми і графіки.

У даному виданні застосована сучасна оновлена система позначень електричних, магнітних, енергетичних, механічних величин, яка відповідає державним стандартам.

1 ОПИС КОНСТРУКЦІЙ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ У НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

1.1 Теоретичне завдання

1. Скласти схему «Класифікація трансформаторів».
2. Виконати ескіз трифазного двообмоткового трансформатора з масляним охолодженням, позначити основні елементи, описати їх призначення.
3. Виконати ескізи основних конструкцій осердь і обмоток силових трансформаторів.
4. Записати умови включення трифазних трансформаторів на паралельну роботу. Проаналізувати, що буде, якщо не виконується одна із зазначених умов.
5. Письмово дати визначення поняттям: коефіцієнт трансформації трансформатора; схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів; напруга короткого замикання трансформатора, струм неробочого ходу.

1.2 Задача

Для трифазного трансформатора ($m = 3$, де m – кількість фаз), який працює в мережі з частотою напруги $f = 50$ Гц і має дані, наведені в табл. 1 та на рис. 1, розрахувати параметри і побудувати схеми заміщення в режимах неробочого ходу, лабораторного короткого замикання (КЗ) та в номінальному режимі, позначити числові значення опорів, напруг, ЕРС та струмів, які позначено на рис. 2.

Таблиця 1 – Параметри трифазних трансформаторів

Номер варіанта	Номінальна повна потужність	Номінальна напруга первинної обмотки	Номінальна напруга вторинної обмотки	Кількість витків вторинної обмотки	Площа поперечного перерізу стрижня	Площа поперечного перерізу яра	Висота стрижня	Висота яра	Відстань між осями стрижнів	Напруга короткого замикання.	Коефіцієнт потужності навантаження	Втрати потужності в режимі КЗ	Схеми і групи з'єднання обмоток
	S_N , кВ·А	U_{pN} , кВ	U_{sN} , кВ	N_s	S_c , см ²	S_j , см ²	h_c , см	h_j , см	l_1 , см	u_k , %	$\cos\varphi_l$, в.о.	P_k , кВт	
1	50	6,0	0,525	192	89	90	25	12	25	6	0,82	1,70	Y/Δ-11
2	100	35,0	6,3	200	580	570	41	14	35	6,5	0,82	2,86	Y/Y-0
3	100	35,0	6,3	200	580	570	41	14	35	6,5	0,82	2,86	Y/Y-0
4	320	35,0	6,3	360	330	326	39	18	35	5,5	0,80	5,60	Y/Y-0
5	5600	110,0	10,5	200	580	570	72	19	45	6,5	0,81	47,8	Y/Y-0
6	1000	35,0	0,69	470	220	210	83	41	46	5,5	0,80	18,5	Y/Δ-11
7	1800	35,0	6,3	640	310	300	85	28	57	6,5	0,85	24,2	Y/Y-0
8	3200	35,0	6,3	660	300	310	100	31	62	7,0	0,84	36,5	Y/Y-0
9	5600	35,0	6,3	600	320	300	110	37	70	7,5	0,85	49,6	Y/Y-0
10	20	6,0	0,4	100	75	72	30	19	21	8,5	0,83	0,95	Y/Y-0
11	60	35,0	6,3	200	580	600	41	34	31	6,5	0,83	2,10	Y/Y-0
12	100	35,0	0,69	150	86	84	38	34	46	6,0	0,80	3,26	Y/Y-0
13	180	35,0	3,15	300	200	180	42	36	49	5,5	0,84	4,10	Y/Δ-11
14	180	35,0	3,15	300	200	180	42	36	49	5,5	0,84	4,10	Y/Y-0
15	20	10,0	0,69	380	322	316	40	50	20	9,0	0,83	0,94	Y/Y-0
16	180	10,0	0,69	388	300	310	35	26	24	5,5	0,83	5,24	Y/Δ-11
17	560	35,0	6,3	400	290	280	42	49	44	6,5	0,80	9,30	Y/Δ-11
18	1000	35,0	10,5	390	300	290	56	52	50	6,5	0,80	15,1	Y/Y-0
19	50	6,0	3,15	400	280	270	25	22	25	5,5	0,85	3,14	Δ/Y-11
20	100	10,0	3,15	600	320	310	41	24	35	9,0	0,84	5,04	Y/Y-0
21	180	35,0	6,3	350	350	340	52	26	39	6,5	0,85	4,20	Y/Y-0
22	180	35,0	6,3	350	350	340	52	26	39	6,5	0,85	4,20	Y/Δ-11
23	560	35,0	3,15	400	340	330	72	39	45	6,5	0,85	9,32	Y/Δ-11
24	1000	110	10,5	550	346	340	83	61	46	5,5	0,84	12,9	Y/Y-0

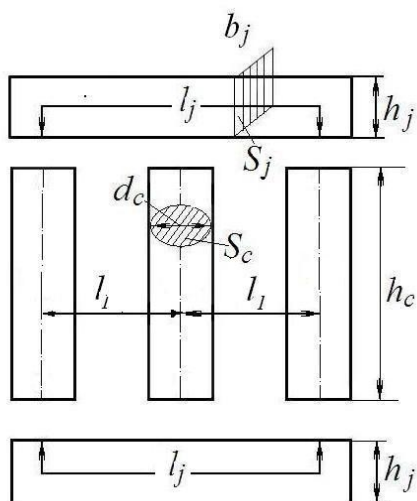


Рисунок 1 – Розміри осердя трансформатора

чення. Визначити максимальне значення ККД і порівняти його з номінальним значенням.

Примітка: у розділі прийняті позначення:

- первинна (*prime*) обмотка – індекс p ;
- вторинна (*second*) обмотка – індекс s ;
- активний опір R_p і реактивний опір розсіювання $X_{\sigma p}$ первинної обмотки;
- зведений активний опір R'_s і зведений реактивний опір розсіювання $X'_{\sigma s}$ вторинної обмотки;
- активний R_m та реактивний X_m опори вітки намагнічування.

Розрахувати і побудувати характеристики неробочого ходу трансформатора $P_o(U_{\phi po})$, $I_{po}(U_{\phi po})$, $\cos\phi_{po}(U_{\phi po})$ і лабораторного короткого замикання $P_k(U_{\phi pk})$, $I_{pk}(U_{\phi pk})$, $\cos\phi_{pk}(U_{\phi pk})$, тобто залежності потужностей, первинних струмів та коефіцієнтів потужності від первинної напруги для зазначених режимів.

Розрахувати номінальне значення коефіцієнта корисної дії (ККД) трансформатора і значення навантаження (у частинах від номінальної потужності), при якому ККД трансформатора досягає максимального значення.

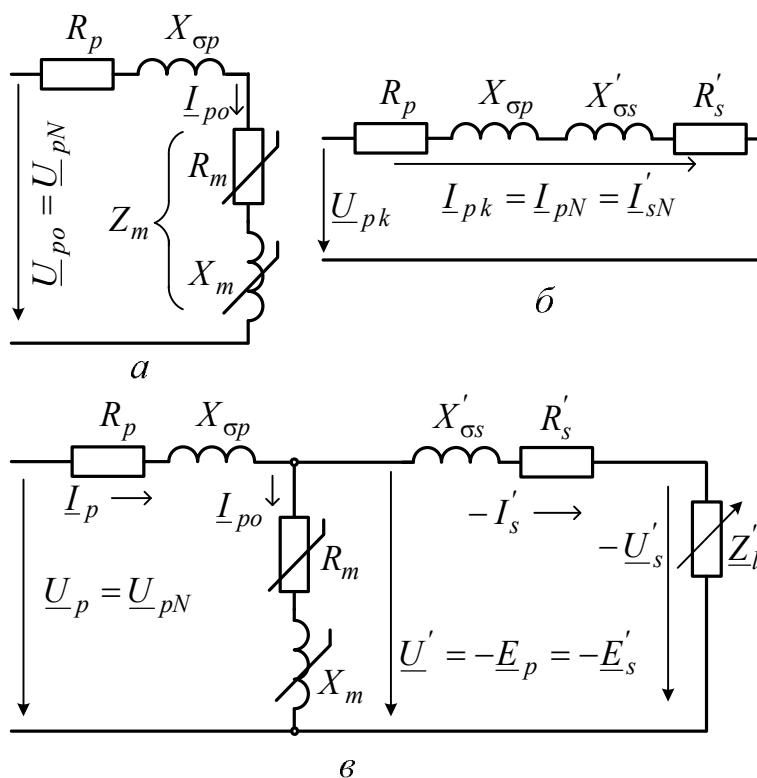


Рисунок 2 – Схеми заміщення трансформатора в режимах:

- a – неробочого ходу;
- b – лабораторного короткого замикання;
- v – в номінальному режимі.

1.3 Методичні вказівки для розв'язання задачі

Розрахуйте номінальні фазні значення первинних $U_{\phi pN}$ і вторинних $U_{\phi sN}$ напруг трансформатора за наведеними в табл. 1 значенням лінійних напруг (U_{pN} і U_{sN} відповідно). У подальших розрахунках використовуйте тільки значення фазних напруг.

Визначте магнітний потік в осерді трансформатора:

$$\Phi = \frac{U_{\phi sN}}{4,44 \cdot f \cdot N_s}.$$

Визначте магнітну індукцію в стрижнях B_c і ярах трансформатора B_j :

$$B_c = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot S_c}; \quad B_j = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot S_j},$$

де k_{Fe} – коефіцієнт заповнення сталлю осердя трансформатора, який при ізоляції сталевих листів лаком дорівнює 0,95.

Отримані значення магнітних індукцій повинні знаходитись в інтервалі від 1,3 Тл до 1,6 Тл. Якщо отримані значення виходять за цей інтервал, запропонуйте, як необхідно змінити площу поперечного перерізу стрижнів і ярем трансформатора. Вашу пропозицію підтвердить розрахунками:

1) виберіть значення магнітних індукцій із зазначеного інтервалу, перерахуйте площу поперечного перерізу стрижнів S_c і ярем S_j трансформатора:

$$S_c = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot B_c}; \quad S_j = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot B_j}.$$

При розрахунках ступінчастістю перерізу стрижнів нехтуємо. Вважаємо, що S_c – ефективна площа поперечного перерізу стрижня, м²;

2) розрахуйте діаметр стрижнів d_c і висоту ярем h_j . При перерахунку поперечного перерізу яра прийняти, що його ширина b_j дорівнює значенню діаметра стрижня d_c і, відповідно, уточніть нове значення висоти яра h_j :

$$d_c = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi}}; \quad h_j = \frac{S_j}{b_j}.$$

Отримані значення площ використовуйте у подальших розрахунках.

Визначте напруженість магнітного поля в стрижнях і ярах (H_c і H_j відповідно) для електротехнічної сталі 3411, згідно з даними табл. 2. Розрахуйте магніторушійну силу (МРС) на фазу трансформатора. При розрахунках необхідно враховувати МРС для повітряних проміжків в стиках стрижнів і ярем

трансформаторів. Кількість стиків на одну фазу вважають рівною $7/3$ та приймають сумарну величину повітряних проміжків $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м. Довжина силової лінії магнітного поля в ярмі трансформатора

$$l_j = 2 \cdot l_1 + h_j.$$

Таблиця 2 – Напруженість магнітного поля H і питомі магнітні втрати потужності p_{mag} для електротехнічної сталі 3411 залежно від магнітної індукції B

B , Тл	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
H , А/м	0	64	127	190	260	318	397	502	647	843	1140	1580	2500	4370
p_{mag} , Вт/кг	0	0,1	0,24	0,54	0,61	0,76	0,96	1,20	1,46	1,76	2,10	2,45	2,80	3,37

Розрахуйте середнє значення МРС F_a для однієї фази, визначивши шляхи проходження магнітного потоку в ярмах і стрижнях (рис. 1):

$$F_a = H_c \cdot h_c + \frac{2}{3} H_j \cdot l_j + \frac{7}{3} \cdot \frac{B_c}{\mu_0} \cdot \delta,$$

де μ_0 – магнітна постійна, яка дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Прийняти, що магнітна індукція в стиках ярем і стрижнів дорівнює магнітній індукції в стрижнях. За даними табл. 2 побудуйте графіки залежності $H(B)$ і $p_{mag}(B)$. Це дозволить вибрати більш точні значення напруженості і питомих магнітних втрат залежно від значення магнітної індукції.

Визначте кількість витків первинної обмотки трансформатора,

$$N_p = \frac{N_s \cdot U_{\phi p N}}{U_{\phi s N}}.$$

Пам'ятайте, що кількість витків повинна бути цілим числом.

Визначте реактивну складову намагнічуючого струму:

$$I_{or} = \frac{F_a}{\sqrt{2} \cdot k_g \cdot N_p},$$

де k_g – коефіцієнт, який враховує наявність вищих гармонік в намагнічуючому струмі (значення k_g знаходиться у межах 1,5–2,2).

Маса сталі стрижнів m_c і ярм m_j трансформатора:

$$m_c = n_c \cdot S_c \cdot h_c \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe}; \quad m_j = n_j \cdot S_j \cdot l_j \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe},$$

де l_y – довжина ярма:

$$l_y = 2 \cdot l_1 + d_c;$$

n_c і n_j – кількість стрижнів і ярем осердя трансформатора, відповідно,

$$n_c = 3; \quad n_j = 2;$$

γ_{Fe} – питома маса сталі, яка становить $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Магнітні втрати потужності в осерді трансформатора (разом основні і додаткові):

$$P_{mag} = (k_d + 1) \cdot (p_{magc} \cdot m_c + p_{magj} \cdot m_j),$$

де p_{magc} , p_{magj} – питомі втрати потужності в стрижнях и ярмах трансформатора, Вт/кг, (питомі втрати потужності обирайте з табл. 2 згідно до значення магнітної індукції за залежністю $p_{mag}(B)$);

k_{ad} – коефіцієнт додаткових втрат (P_{ad}) вибираємо з діапазону 0,1–0,15.

Активна складова струму неробочого ходу:

$$I_{oa} = \frac{P_{mag}}{m \cdot U_{\phi p N}}.$$

Повний струм неробочого ходу первинної обмотки і коефіцієнт потужності трансформатора в режимі неробочого ходу:

$$I_{po} = \sqrt{I_{or}^2 + I_{oa}^2}; \quad \cos \varphi_{po} = \frac{P_{mag}}{m \cdot U_{\phi p N} \cdot I_{po}}.$$

Параметри схеми заміщення трансформатора (рис. 2, а) в режимі неробочого ходу, а саме, повний, активний та реактивний опори:

$$Z_o = \frac{U_{\phi p N}}{I_{po}}; \quad R_o = \frac{P_{mag}}{m \cdot I_{po}^2}; \quad X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2}.$$

Щоб визначити всі параметри схеми заміщення трансформатора, використовують також режим лабораторного КЗ, а для цього попередньо визначаємо напругу КЗ:

$$U_{\phi p k} = \frac{u_k}{100\%} \cdot U_{\phi p N}$$

та номінальний струм первинної обмотки:

$$I_{pN} = \frac{S_N}{m \cdot U_{\phi p N}}.$$

Тоді для варіанта схеми заміщення на рис. 2, б маємо повний, активний та реактивний опори трансформатора в режимі КЗ:

$$Z_k = \frac{U_{\varphi pk}}{I_{pN}}; \quad R_k = \frac{P_k}{m \cdot I_{pN}^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Коефіцієнт потужності трансформатора в режимі лабораторного КЗ:

$$\cos \varphi_{pk} = \frac{P_k}{m \cdot U_{\varphi pk} \cdot I_{pN}}.$$

Параметри схеми заміщення трансформатора в номінальному режимі:

– активний опір первинної обмотки дорівнює зведеному значенню активного опору вторинної обмотки трансформатора, тому за рис. 2, б:

$$R_p = R'_s = \frac{R_k}{2};$$

– реактивний опір первинної обмотки дорівнює зведеному значенню реактивного опору вторинної обмотки трансформатора, тому за рис. 2, б:

$$X_{\sigma p} = X'_{\sigma s} = \frac{X_k}{2};$$

– опори вітки намагнічування трансформатора за рис. 2, а:

$$R_m = R_o - R_p;$$

$$X_m = X_o - X_{\sigma p}.$$

Зведене значення ЕРС взаємодукції вторинної обмотки трансформатора E'_s (рис. 2, в) отримайте із векторної діаграми трансформатора в режимі неробочого ходу (рис. 3), яку слід побудувати у масштабі.

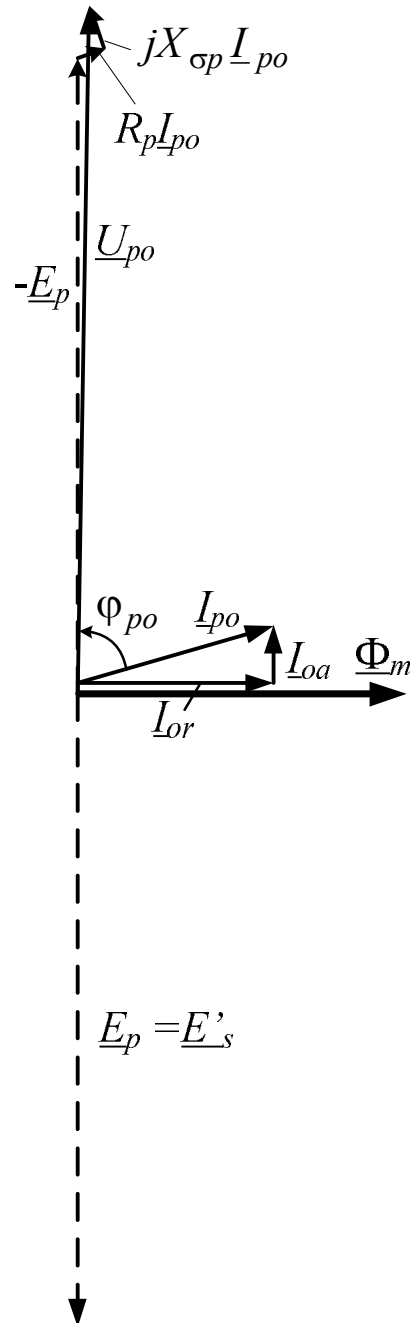


Рисунок 3 – Векторна діаграма трансформатора в режимі неробочого ходу

Коефіцієнт корисної дії трансформатора при номінальному навантаженні:

$$\eta_N = 1 - \frac{P_o + \beta_{Is}^2 \cdot P_k}{\beta_{Is} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_l + P_o + \beta_{Is}^2 \cdot P_k},$$

де P_o – втрати потужності в режимі неробочого ходу, які є магнітними втратами потужності в магнітопроводі трансформатора, тобто $P_o = P_{mag}$;

β_{Is} – коефіцієнт струму навантаження трансформатора, а саме:

$$\beta_{Is} = \frac{I_s}{I_{sN}}$$

(при номінальному навантаженні, природно, $\beta_{Is} = \beta_{IsN} = 1$);

I_s – струм вторинної обмотки трансформатора (струм навантаження);

I_{sN} – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора.

Максимальне значення ККД трансформатора досягається, коли постійні втрати потужності дорівнюють змінним втратам. Значення коефіцієнта струму навантаження, при якому ККД максимальний:

$$\beta_{Is \max} = \sqrt{\frac{P_o}{P_k}}.$$

Тоді максимальне значення ККД трансформатора:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{P_o + \beta_{Is \max}^2 \cdot P_k}{\beta_{Is \max}^2 \cdot S_N \cdot \cos \varphi_l + P_o + \beta_{Is \max}^2 \cdot P_k}.$$

Порівняйте номінальне і максимальне значення ККД трансформатора. Поясніть недоцільність проектування трансформаторів з максимальним ККД при номінальному навантаженні ($\beta_{Is} = 1$).

Побудуйте характеристики неробочого ходу $P_o, I_{po}, \cos \varphi_{po}(U_{\phi po})$ і лабораторного КЗ трансформатора $P_k, I_{pk}, \cos \varphi_{pk}(U_{\phi pk})$. Для цього повторіть розрахунки параметрів трансформатора в режимах неробочого ходу та лабораторного КЗ для відносних значень напруги в частках від $U_{\phi pN}$:

$$U_{\phi po}^* = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,1; \quad U_{\phi pk}^* = 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1.$$

Результати розрахунків занесіть в табл. 3 і 4 (числа в таблицях вказані для прикладу). При розрахунку параметрів КЗ вважайте, що струм КЗ змінюється лінійно через відсутність насичення.

Таблиця 3 – Розрахункові значення для побудови характеристик неробочого ходу трансформатора

Величини	Значення					
$U_{\text{про*}}, \text{В.О.}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1
$U_{\text{фр}} = U_{\text{про*}} \cdot U_{\text{фрN}}, \text{В}$	4040	8080	12120	16170	20210	22270
$U_{\text{фс}} = U_{\text{про*}} \cdot U_{\text{фсN}}, \text{В}$	700	1400	2080	2770	3470	3810
$\Phi = \frac{U_{\text{фс}}}{4,44 \cdot f \cdot N_s}, \text{Вб}$	0,010	0,019	0,028	0,038	0,047	0,052
$B_c = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot S_c}, \text{Тл}$	0,27	0,54	0,81	1,08	1,35	1,49
$B_j = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot S_j}, \text{Тл}$	0,28	0,56	0,83	1,11	1,39	1,53
$H_c = f(B_c), \text{А/м}, \quad \text{з табл. 2}$	86	171	322	658	1184	2480
$H_j = f(B_j), \text{А/м}, \quad \text{з табл. 2}$	88	174	411	677	1568	2550
$F_a = H_c \cdot h_c + \frac{2}{3} H_j \cdot l + \frac{7}{3} \cdot \frac{B_c}{\mu_0} \cdot \delta, \text{А}$	167	331	687	1187	2429	4233
$I_{or} = \frac{F_a}{\sqrt{2} \cdot k_g \cdot N_p}, \text{А}$	0,041	0,081	0,168	0,291	0,595	1,037
$p_{\text{mag } c}, \text{Вт/кг}, \quad \text{з табл. 2}$	0,25	0,50	0,76	1,4	2,25	2,4
$p_{\text{mag } j}, \text{Вт/кг}, \quad \text{з табл. 2}$	0,27	0,54	0,79	1,45	2,32	2,5
$P_{\text{mag}} = (k_d + 1) \times (p_{\text{mag } c} \cdot m_c + p_{\text{mag } j} \cdot m_j), \text{Вт}$	332	663	1051	2020	2976	3344
$I_{oa} = \frac{P_{\text{mag}}}{m \cdot U_{\text{фрN}}}, \text{А}$	0,005	0,01	0,017	0,033	0,049	0,055
$I_{op} = \sqrt{I_{or}^2 + I_{oa}^2}, \text{А}$	0,041	0,082	0,169	0,292	0,596	1,040
$\cos \varphi_{po} = \frac{P_{\text{mag}}}{m \cdot U_{\text{фрN}} \cdot I_{po}}$	0,122	0,120	0,10	0,113	0,082	0,052

Таблиця 4 – Розрахункові значення для побудови характеристик лабораторного КЗ трансформатора

Величини	Значення				
$U_{\varphi pk*}, \text{ В.О.}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
$U_{\varphi pk} = U_{\varphi pk*} \cdot U_{\varphi pN}, \text{ В}$	404	808	1212	1616	2020
$I_{pk} = U_{\varphi pk*} \cdot I_{pN}, \text{ А}$	0,99	1,98	2,97	3,96	4,95
$P_k = m \cdot I_{pk}^2 \cdot R_k, \text{ Вт}$	447	1788	4022	7151	11173
$\cos \varphi_{pk} = \frac{P_k}{m \cdot U_{\varphi pk} \cdot I_{pN}}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

2 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Задача

Побудуйте схему трифазної ($m_s = 3$), двошарової петльової обмотки статора машини змінного струму з цілою кількістю пазів на полюс і фазу q_s зі скороченням кроку β_s , згідно з даними, наведеними в табл. 5.

Розрахуйте коефіцієнти розподілу, скорочення та обмотувальні коефіцієнти для 1-ї, 5-ї та 7-ї гармонік струму обмотки статора.

Письмово дайте відповідь на питання: навіщо скорочують і розподіляють обмотки статора машин змінного струму і як скорочення і розподіл обмотки впливають на величину ЕРС 1-ї гармоніки?

Таблиця 5 – Дані обмотки статора машини змінного струму

Номер варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кількість пазів статора Q_s	36	30	24	48	36	18	36	60	54	36	36	48
Кількість полюсів $2p$	4	2	4	4	2	2	6	4	2	4	4	4
Відносне скорочення кроку β_s	8/9	4/5	5/6	5/6	5/6	7/9	5/6	4/5	8/9	7/9	8/9	5/6
Схема з'єднання	Y	Y	Δ	Y	Δ	Y	Δ	Δ	Y	Y	Y	Y
Номер варіанта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Кількість пазів статора Q_s	30	24	18	36	48	48	36	30	24	48	36	18
Кількість полюсів $2p$	2	4	2	6	6	8	4	2	4	4	2	2
Відносне скорочення кроку β_s	4/5	5/6	7/9	5/6	7/8	5/6	8/9	4/5	5/6	5/6	5/6	7/9
Схема з'єднання	Y	Y	Y	Δ	Δ	Y	Y	Y	Δ	Y	Δ	Y

2.2 Методичні вказівки до розв'язання задачі

Розрахуйте кількість пазів на полюс і фазу:

$$q_s = \frac{Q_s}{2p \cdot m_s}.$$

Визначте полюсний крок в зубцевих кроках:

$$\tau_p = \frac{Q_s}{2p}.$$

Розрахуйте діаметральний крок обмотки статора по пазах $y_{s.d}$ та крок зі скороченням $y_{s.sh}$ (з урахуванням β_s):

$$y_{s.d} = \frac{Q_s}{2p}; \quad y_{s.sh} = \beta_s \cdot \frac{Q_s}{2p}.$$

На рис. 4–6 наведено приклад побудови схеми трифазної розподіленої двошарової петльової обмотки статора зі скороченим кроком з такими параметрами: $Q_s = 24$, $2p = 4$, $\beta_s = 5/6$, $q_s = 2$, $y_{s.sh} = 5$.

По аналогії побудуйте схему власного варіанту обмотки. Для цього в графічному редакторі, або на аркуші міліметрового паперу, з інтервалом в 1,0 см проведіть лінії, які позначають пази, згідно із завданням, пронумеруйте їх. Розмітьте полюсні кроки τ_p в зубцях статора вертикальними пунктирними лініями і побудуйте схему обмотки для однієї фази A , як показано на рис. 4.

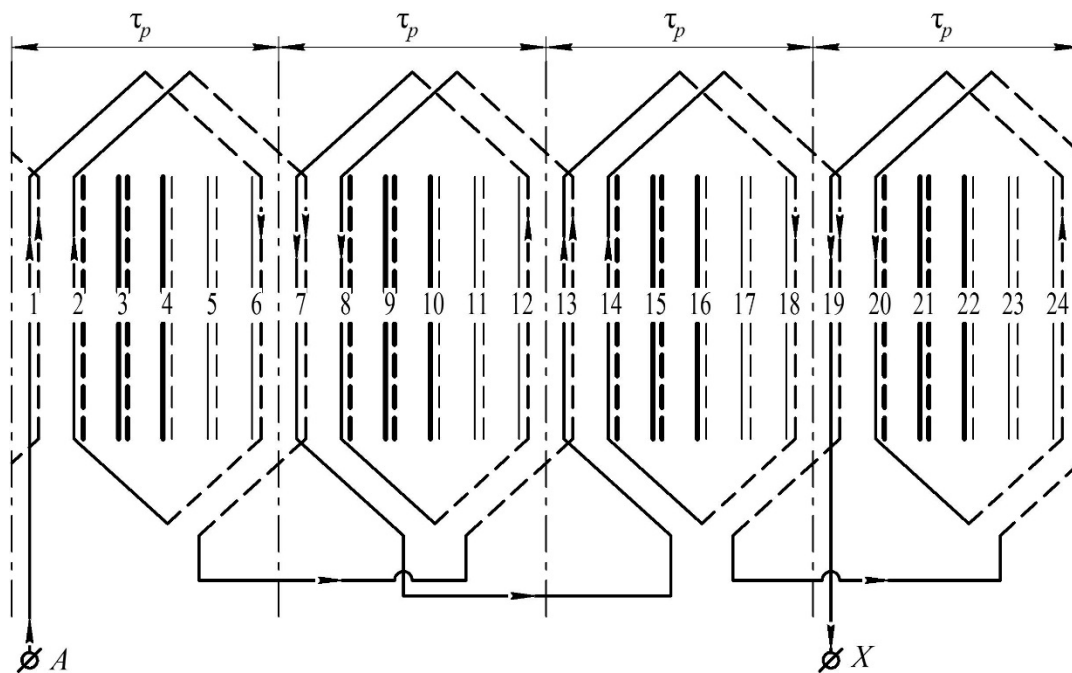
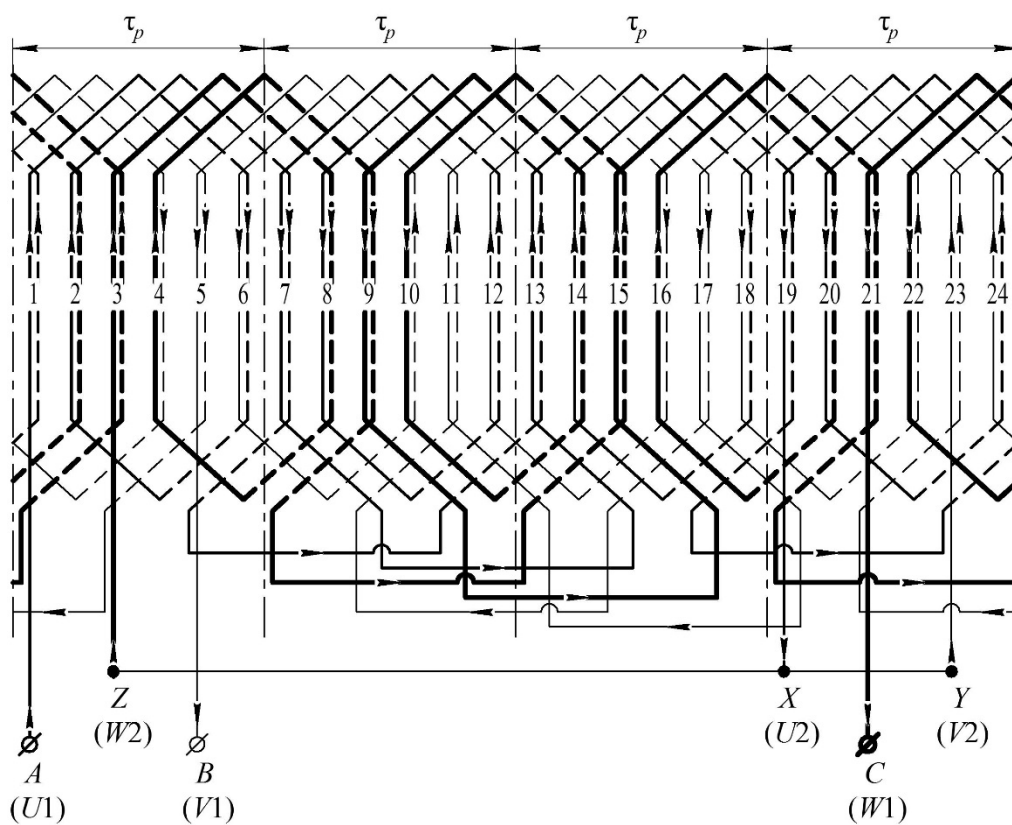
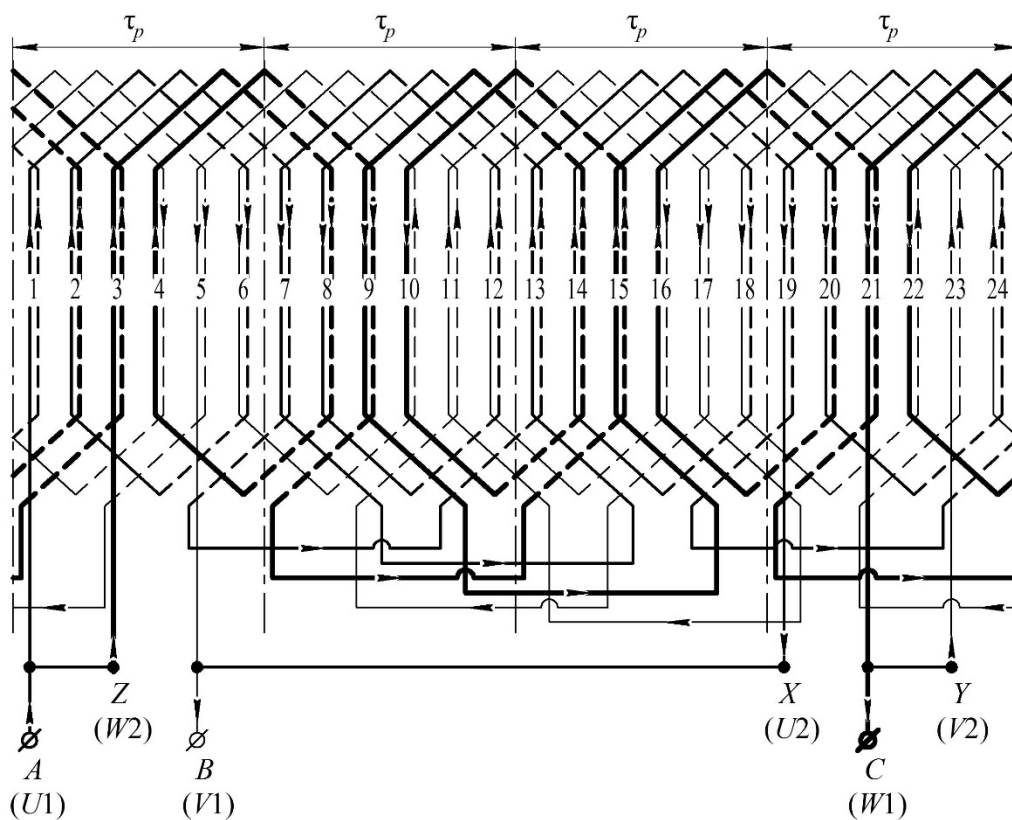


Рисунок 4 – Приклад побудови схеми трифазної розподіленої двошарової обмотки статора зі скороченим кроком для однієї фази

Візьміть олівці трьох кольорів (наприклад, для фази A – чорний, для фази B – зелений, для фази C – червоний). Розмітьте верхній шар обмотки статора лініями різних кольорів згідно зі значенням q_s для усіх трьох фаз і виконайте усі потрібні з'єднання відповідно до схеми, що задана в табл. 5.



a



б

Рисунок 5 – Приклад схеми трифазної розподіленої двошарової петльової обмотки статора зі скороченим кроком ($Q_s = 24$, $2p = 4$, $\beta_s = 5/6$, $q_s = 2$, $y_{s.sh} = 5$):

a – при з'єднанні в «зірку»; *б* – при з'єднанні в «трикутник»

На рис. 5, а наведено приклад побудови трифазної скороченої двошарової петльової обмотки при її з'єднанні в «зірку», на рис. 5, б – при з'єднанні в «трикутник».

Обмоткові коефіцієнти K_{Wv} для 1-ї, 5-ї і 7-ї гармонік, (номери гармонік струму і напруги $v = 1, 5, 7$) можна розрахувати:

$$K_{Wv} = K_{pv} \cdot K_{dv},$$

де K_{pv} – коефіцієнт скорочення, що враховує зменшення ЕРС v -ї гармоніки через скорочення кроку обмотки порівняно із діаметральною обмоткою:

$$K_{pv} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta_s \cdot v\right);$$

K_{dv} – коефіцієнт розподілу, що враховує зменшення ЕРС v -ї гармоніки обмотки, яка розподілена по пазах, порівняно із зосередженою обмоткою:

$$K_{dv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot v}{2 \cdot m_s}\right)}{q_s \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot v}{2 \cdot m_s \cdot q_s}\right)}.$$

Діюче значення першої гармоніки ЕРС ($v=1$) скороченої розподіленої обмотки статора:

$$E_s = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_s \cdot K_{W1},$$

де $K_{W1} = K_{p1} \cdot K_{d1}$ – обмотковий коефіцієнт першої гармоніки.

Значення K_{W1} для скороченої розподіленої обмотки статора завжди менше одиниці. Тому в машинах змінного струму, в яких виконаний розподіл по пазах обмотки статора та скорочення її кроку, значення першої гармоніки ЕРС буде менше, ніж у діаметральній і зосередженій обмотки.

3 ЕНЕРГЕТИЧНА ДІАГРАМА ТА ВИБІР ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1 Задачі

Задача № 1

Побудувати за даними табл. 6 енергетичну діаграму трифазного ($m_s = 3$ – кількість фаз) асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором. Обмотка статора з'єднана в «зірку» (Y). Частота напруги в мережі $f = 50$ Гц.

Задача № 2

Вибрати для трифазного АД з фазним ротором, дані якого приведено в табл. 6, триступеневий пусковий реостат, який забезпечить пуск двигуна зі значенням струму, який не перевищує двох значень номінального струму ($I'_{r1} = 2I'_{rN}$). Побудувати пускові характеристики M , $I'_r(s)$: природну, з одним, двома і трьома ступенями реостата. Письмово вказати, які у АД є проблеми при пуску і як їх вирішують (з урахуванням конструкції ротора: короткозамкнений або фазний). Прийняти значення активних та зведених індуктивних опорів розсіяння обмоток ротора і статора:

$$R'_r = \frac{1}{4} \cdot R_k; \quad R_s = \frac{3}{4} \cdot R_k; \quad X'_r = \frac{1}{3} \cdot X_k; \quad X_s = \frac{2}{3} \cdot X_k.$$

3.2 Методичні вказівки до розв'язання задач

3.2.1 Методичні вказівки до розв'язання задачі №1

Перетворення електричної енергії в механічну в АД, як і в інших електричних машинах, пов'язане з втратами енергії, тому корисна потужність двигуна P завжди менша потужності, яку АД споживає з мережі P_{in} , на величину втрат потужності ΔP .

Потужність, яку АД споживає з мережі в номінальному режимі:

$$P_{in\,nom} = \frac{P_N}{\eta_N}.$$

Втрати потужності в електричних машинах ΔP поділяються на основні та додаткові. Основні втрати потужності складаються з магнітних, електричних та механічних втрат потужності.

При розрахунках слід прийняти значення:

- механічні втрати потужності, $P_{mec} = 0,02 P_N$;
- магнітні втрати потужності, $P_{mag} = 0,01 P_N$;
- додаткові втрати потужності, $P_{ad} = 0,005 P_N$.

Таблиця 6 – Дані асинхронних двигунів

Номер варіа-	Номі- нальна потуж- ність	Кіль- кість пар полю- сів	Номі- на- льне ков- зання	Номіна- льна напруга обмотки статора	Номі- наль- ний ККД	Номіна- льний коефіці- єнт поту- жності	Результати дослідів лабораторного КЗ:	
							реактив- ний опір	актив- ний опір
	P_N , кВт	p	s_N , %	U_N , кВ	η_N , %	$\cos\varphi_N$	X_k , Ом	R_k , Ом
1	10	4	4,3	0,38	80,5	0,87	1,8	0,8
2	15	3	2,7	0,38	80	0,83	2,5	0,7
3	20	2	3,1	0,38	81,8	0,73	1,8	0,55
4	30	1	3,5	0,38	83	0,74	2,4	0,9
5	40	3	2	0,66	86,5	0,89	2,6	0,5
6	50	2	3,0	0,66	85,5	0,86	2,7	0,90
7	75	1	3,2	0,66	87,5	0,81	3,1	1,08
8	11	4	4,7	0,38	88	0,75	1	0,48
9	15	1	2,3	0,38	90	0,91	2,8	0,7
10	18,5	2	2,7	0,38	90	0,88	2,8	0,84
11	22,0	3	2,5	0,38	89,0	0,90	2,9	0,85
12	30,0	4	2,0	0,66	90,5	0,81	2,9	0,6
13	37	5	1,8	0,66	90,5	0,81	3,3	0,6
14	45	3	2,5	0,66	91	0,75	2,8	0,6
15	55	3	2,5	0,66	92,5	0,78	2,9	0,75
16	75	3	2,2	0,66	92,5	0,82	3,5	0,8
17	90	3	2,5	0,66	93,0	0,86	3,6	1,25
18	110	3	2,2	0,66	94	0,89	5,4	1,3
19	132	2	2,0	0,66	94,0	0,89	5,2	2,48
20	160	1	1,65	0,66	94	0,9	9,6	1,6
21	200	4	1,8	0,66	94	0,86	4,2	0,8
22	250	3	1,72	0,66	93,5	0,9	4	0,6
23	315	2	1,8	0,66	94,5	0,91	2,4	0,4
24	32,5	4	5,3	0,66	85,0	0,89	2,4	0,6

Для інженерних розрахунків можна прийняти, що механічні і магнітні втрати потужності постійні і разом дорівнюють втратам потужності в режимі неробочого ходу. Додаткові втрати з достатньою точністю також можна віднести до постійних втрат. В них включають всі види інших втрат, що не враховані вище: від дії вищих гармонік МРС, від пульсацій магнітної індукції в зубцях та інші.

При частоті напруги в мережі $f = 50$ Гц і діапазоні номінального ковзання двигунів $s_N = 0,02\text{--}0,08$ частота перемагнічування ротора знаходиться в межах кількох герц ($f_r = f_s \cdot s_N = 1\text{--}4$ Гц). Тому магнітні втрати в осерді ротора на практиці не враховують і на енергетичній діаграмі не показують. Загальні магнітні втрати потужності дорівнюють магнітним втратам потужності в осерді статора:

$$P_{mag} = P_{mag.s.}$$

Електричні втрати потужності в обмотках статора і ротора асинхронного двигуна P_{el} змінні і залежать від навантаження:

1) електричні втрати потужності в обмотці статора в номінальному режимі:

$$P_{el.s\ nom} = m_s \cdot I_{sN}^2 \cdot R_s,$$

де I_{sN} – номінальний струм статора:

$$I_{sN} = \frac{P_{in\ nom}}{m_s \cdot U_{sN} \cdot \cos \varphi_N};$$

U_{sN} – фазна напруга обмотки статора, яка при з'єднанні у «зірку»:

$$U_{sN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}};$$

2) електричні втрати потужності в обмотці ротора прямо пропорційні ковзанню:

$$P_{el.r} = s \cdot P_{em},$$

де P_{em} – електромагнітна потужність асинхронного двигуна:

$$P_{em} = P_{in\ nom} - (P_{mag} + P_{el.s}).$$

Загальні втрати потужності асинхронного двигуна при навантаженні, яке залежать від коефіцієнту струму навантаження β_k , що характеризує частку від номінального навантаження:

$$\Delta P_{nom} = P_{mag} + P_{mec} + P_{ad} + \beta_{Is}^2 \cdot (P_{el.s\ nom} + P_{el.r\ nom}),$$

де $P_{el.s nom}$ і $P_{el.r nom}$ – електричні втрати потужності в обмотках статора і ротора (відповідно) в номінальному режимі;

β_{Is} – коефіцієнт струму навантаження асинхронного двигуна, при номінальному навантаженні $\beta_{Is} = \beta_{IsN} = 1$.

Побудуйте в масштабі енергетичну діаграму АД (приклад енергетичної діаграми асинхронного двигуна наведено на рис. 6, де крім вже названих величин позначено P_{mec} – механічна потужність; P_{out} – вихідна потужність). Біля кожного значення потужності та втрат потужностей проставте їх чисельні значення.

Розрахуйте, згідно з побудованою діаграмою, номінальний ККД двигуна:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{in nom}} = 1 - \frac{\Delta P_{nom}}{P_{in nom}},$$

де ΔP_{nom} – сумарні втрати потужності двигуна у номінальному режимі, які складаються з постійних і змінних втрат потужності у номінальному режимі:

$$\Delta P_{nom} = P_{const} + P_{var nom}.$$

Сума постійних втрат потужності в АД:

$$P_{const} = P_{mag} + P_{mec} + P_{ad}.$$

Сума змінних втрат потужності в АД в номінальному режимі:

$$P_{var nom} = P_{el.s nom} + P_{el.r nom}.$$

Порівняйте отримане значення ККД з заданим в табл. 6.

При розв'язанні задачі № 2 використовуйте отримане значення.

3.2.2 Методичні вказівки до рішення задачі № 2

При виборі значень опору пускових реостатів прийняти обмеження пускового струму ротора (I'_{r1}) значенням двох номінальних струмів:

$$I'_{r1} = 2I'_{rN}.$$

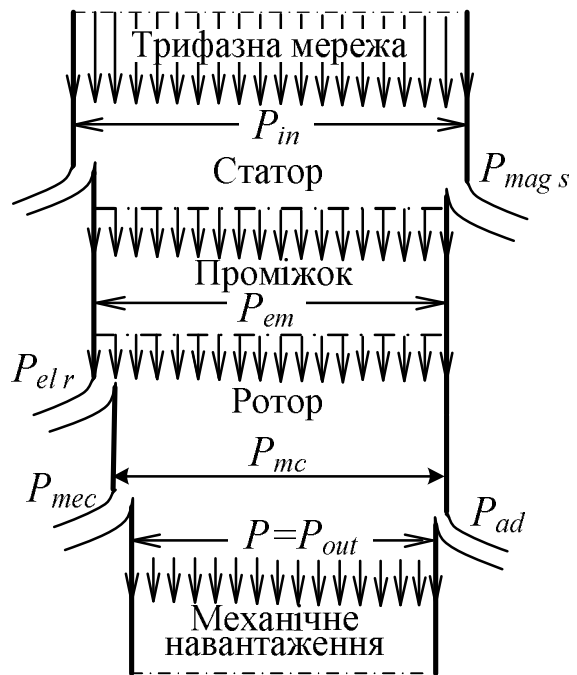


Рисунок 6 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

При роботі зі зведеними параметрами обмотки ротора АД вважаємо, що $I_s = I_r'$.

Електромагнітний момент асинхронного двигуна:

$$M = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \cdot R_r' \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot s \cdot \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (X_s + X_r')^2 \right]}.$$

Зведене значення струму ротора асинхронного двигуна:

$$I_r' = \frac{U_{sN}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (X_s + X_r')^2}}.$$

Значення зведеного струму ротора при прямому пуску ($s = 1$):

$$I_{r1}' = \frac{U_{sN}}{\sqrt{(R_s + R_r')^2 + (X_s + X_r')^2}}.$$

Значення електромагнітного моменту при прямому пуску ($s = 1$):

$$M_1 = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \cdot R_r' \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot \left[(R_s + R_r')^2 + (X_s + X_r')^2 \right]}.$$

Визначте перевищення пускового струму при прямому пуску:

$$K_{I1} = \frac{I_{r1}'}{I_{rN}'}.$$

З наведеного нижче рівняння визначте зведений опір пускового реостата R_{reos}' , який забезпечить обмеження пускового струму дворазовим значенням номінального струму:

$$I_{r1}' = 2I_{rN}' = \frac{U_{sN}}{\sqrt{(R_s + R_r' + R_{reos}')^2 + (X_s + X_r')^2}},$$

де R_{reos}' – сумарне значення опору трьох ступенів пускових реостатів.

Розділіть значення отриманого опору на три ступені:

$$R_{reos1}' = R_{reos2}' = R_{reos3}' = R' = \frac{R_{reos}'}{3}.$$

Розрахуйте електромагнітний момент двигуна з k ступенями пускових реостатів, ($k = 1, 2, 3$) при різних значення ковзання s , які наведено в табл. 7:

$$M = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 (R'_r + k \cdot R') \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot s \left\{ \left[R_s + \frac{R'_r + k \cdot R'}{s} \right]^2 + (X_s + X'_r)^2 \right\}}.$$

Таблиця 7 – Параметри розрахунків характеристик $M(s)$, $I'_r(s)$.

Кількість ступенів реостатів	Параметр	Значення ковзання s								
		0	s_N	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	$s_{cr} kR$	1
–	I'_r, A		I'_{rN}							
	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$									
+ R'	I'_r, A									
	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$									
+ $2R'$	I'_r, A									
	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$									
+ $3R'$	I'_r, A									$2I'_{rN}$
	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$									

Критичне ковзання s_{cr} , яке відповідає максимальному електромагнітному моменту асинхронного двигуна без пускового реостата:

$$s_{cr} \approx \frac{R'_r}{X_s + X'_r}.$$

Максимальний електромагнітний момент АД при критичному ковзанні:

$$M_{\max} = \frac{m \cdot U_{sN}^2 \cdot p}{4\pi \cdot f \cdot (X_s + X'_r)}.$$

Значення максимального електромагнітного моменту при введенні пускових реостатів не змінюється, тому що не залежить від критичного ковзання.

Розрахуйте значення критичних ковзань АД з k ступенями реостатів, які введені до обмотки ротора:

$$s_{cr.R} \approx \frac{R_r' + R'}{X_s + X_r'}; \quad s_{cr.2R} \approx \frac{R_r' + 2R'}{X_s + X_r'}; \quad s_{cr.3R} \approx \frac{R_r' + 3R'}{X_s + X_r'}.$$

Побудуйте чотири характеристики $I_r'(s)$ на одному графічному полі, а саме: характеристику без пускових реостатів і три характеристики з однією, двома і трьома ступенями пускового реостата.

На тому ж графічному полі побудуйте чотири характеристики $M(s)$ в окремому масштабі, а саме: одну – без реостатів і три характеристики з однією, двома і трьома ступенями реостатів.

Укажіть на побудованих графіках, при яких значеннях ковзання виводять кожен черговий ступінь реостата.

Закінчуючи розрахунки, зазвичай визначають не зведене (R_{reos}'), а дійсне значення опору пускових реостатів, R_{reos} , але для цього треба багато додаткових даних АД. При їх наявності дійсне значення опору пускових реостатів можливо розрахувати по наведеному нижче алгоритму:

$$R_{reos} = \frac{R_{reos}'}{k_u \cdot k_i},$$

де k_u – коефіцієнт трансформації напруг, який дорівнює:

$$k_u = \frac{K_{ws} \cdot N_s}{K_{wr} \cdot N_r};$$

k_i – коефіцієнт трансформації струмів, який дорівнює

$$k_i = \frac{m_s \cdot N_s \cdot K_{ws}}{m_r \cdot N_r \cdot K_{wr}};$$

m_s та m_r – кількість фаз обмотки статора і ротора відповідно (для АД з фазним ротором $m_s = m_r = 3$);

N_s та N_r – кількість витків на фазу обмоток статора і ротора відповідно;

K_{ws} та K_{wr} – обмоткові коефіцієнти обмотки статора та фазної обмотки ротора відповідно.

4 ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

4.1 Теоретичне завдання

Опишіть особливості конструкції роторів синхронних генераторів (СГ), які використовують на теплових (у тому числі, атомних) електростанціях, на гідроелектростанціях. Поясніть відмінність конструкцій роторів цих генераторів. Наведіть ескізи явно- і неявнополюсного роторів.

Опишіть способи збудження і основні етапи точної і «грубої» синхронізації (самосинхронізації) СГ. Запишіть вимоги щодо включення СГ на паралельну роботу з мережею при точній синхронізації.

4.2 Задача

Побудувати кутову характеристику трифазного ($m_s=3$, де m_s – кількість фаз) явнополюсного СГ за даними, наведеними в табл. 8, і розрахувати його перевантажувальну здатність. Порівняти кутові характеристики трифазних явнополюсних і неявнополюсного СГ; пояснити, чому вони різні.

4.3 Методичні вказівки до розв'язання задачі

Розрахуйте номінальне фазне значення напруги обмотки статора:

$$U_{sN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}.$$

В синхронних машинах електромагнітний момент M_{em} пропорційний електромагнітної потужності P_{em} . Тому можна будувати кутову характеристику як залежність $M_{em}(\theta)$ або як $P_{em}(\theta)$, де θ – кут навантаження («вилиту»), кут між вектором ЕРС E_{so} , яку наводить потік обмотки ротора (потік збудження) в обмотці статора, та вектором напруги статора U_s .

Побудуйте кутову характеристику як залежність $P_{em}(\theta)$:

$$P_{em} = \frac{m_s \cdot U_{sN} \cdot E_{so}}{X_d} \cdot \sin\theta + \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta, \quad (4.1)$$

Таблиця 8 – Дані трифазного синхронного генератора

Номер варіанта	Номінальна напруга обмотки статора	Номінальний коефіцієнт потужності	Відносне значення ЕРС, яка наводиться потоком збудження в обмотці статора	Попережний індуктивний опір	Поздовжній індуктивний опір	Кут між вектором струму обмотки статора та вектором ЕРС статора	Схема з'єднання обмотки статора
	U_N , кВ	$\cos\varphi_N$	$E_{so}^* = \frac{E_{so}}{U_{sN}}$, в.о.	X_q , Ом	X_d , Ом	ψ_N , ел. град.	
1	6	0,9	1,67	4,21	6,42	52	Y
2	0,38	0,91	1,69	0,935	1,42	54	Y
3	10,0	0,92	1,71	5,35	8,82	53	Y
4	6,0	0,93	1,64	2,48	3,82	52	Y
5	6,0	0,90	1,62	3,12	5,04	54	Y
6	0,38	0,89	1,66	5,20	7,46	54	Δ
7	0,38	0,89	1,72	4,02	6,18	52	Y
8	6,0	0,90	1,63	2,12	3,44	53	Y
9	6,0	0,91	1,67	1,96	3,12	52	Y
10	10,0	0,90	1,60	5,00	7,36	54	Y
11	10,0	0,91	1,59	3,18	6,84	50	Y
12	6,0	0,92	1,70	5,10	7,44	51	Y
13	6,0	0,93	1,71	4,18	6,54	52	Y
14	6,0	0,92	1,62	5,24	7,85	54	Y
15	0,23	0,91	1,75	3,36	5,68	55	Δ
16	0,38	0,90	1,78	5,12	8,20	54	Y
17	0,38	0,89	1,72	6,30	9,20	54	Δ
18	0,66	0,88	1,73	6,04	9,28	52	Δ
19	0,66	0,89	1,72	4,12	6,64	54	Δ
20	6	0,9	1,78	5,2	8,1	55	Y
21	10,0	0,91	1,70	4,32	6,56	52	Y
22	10,0	0,92	1,74	6,12	9,43	54	Y
23	6,0	0,91	1,72	4,11	6,42	52	Y
24	0,38	0,88	1,73	2,35	4,12	54	Y

Примітка: E_{so} – ЕРС, яку наводить магнітний потік обмотки збудження в обмотці статора в режимі навантаження: $E_{so} = E_{so}^* \cdot U_{sN}$.

Кутові характеристики синхронних генераторів з явнополюсними и неявнополюсними конструкціями роторів різні, тому що у явнополюсних генераторів $X_q < X_d$, а у неявнополюсних генераторів можна вважати $X_q = X_d$.

Дані розрахунків кутової характеристики занести в табл. 9.

Критичний кут навантаження, при якому електромагнітна потужність буде максимальною, можна розрахувати:

$$\theta_{cr} = \arccos \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta,$$

де розрахунковий коефіцієнт може бути розраховано:

$$\beta = \frac{E_{so}}{4 \cdot U_{sN} \cdot \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right)}.$$

Таблиця 9 – Розрахунок кутової характеристики явнополюсного синхронного генератора

Параметр	Значення кута навантаження θ , ел. град									
	0	θ_N	30	60	θ_{cr}	90	120	135	150	180
$\sin\theta$										
$\frac{m_s \cdot U_{sN} \cdot E_{so}}{X_d} \cdot \sin\theta$, Вт										
$\sin 2\theta$										
$\frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta$, Вт										
$P = \frac{m_s \cdot U_{sN} \cdot E_{so}}{X_d} \cdot \sin\theta + \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta$, Вт										

Номинальний кут навантаження:

$$\theta_N = \psi_N - \varphi_N,$$

де ψ_N – кут між вектором струму обмотки статора I_s в номінальному режимі і вектором ЕРС E_{so} ;

φ_N – кут між вектором фазної напруги U_{sN} і вектором фазного струму обмотки статора I_{sN} в номінальному режимі. Його значення встановлюємо за даними табл. 8 через $\cos\varphi_N$.

Приклад кутової характеристики синхронного генератора з явнополісною конструкцією ротора (гідрогенератор) представлено на рис. 7.

Графік кутової характеристики (крива 3) синхронного генератора з явнополісною конструкцією ротора (рис. 7) фактично є сумою двох характеристик – першої (графік 1) та другої складових (графік 2) формули (4.1).

Тому графік 3 (рис. 7) можна побудувати аналітично, використовуючи значення останньої функції в табл. 9, або спочатку побудувати графіки першої і другої складових (другий та четвертий рядки в табл. 9, графіки 1 і 2 рис. 7), а потім графічно їх додати.

Електромагнітна потужність $P_{em.max}$ при куті навантаження θ_{cr} максимальна. Для явнополісного синхронного генератора зазвичай кут $\theta_{cr}=75-80$ ел. град.

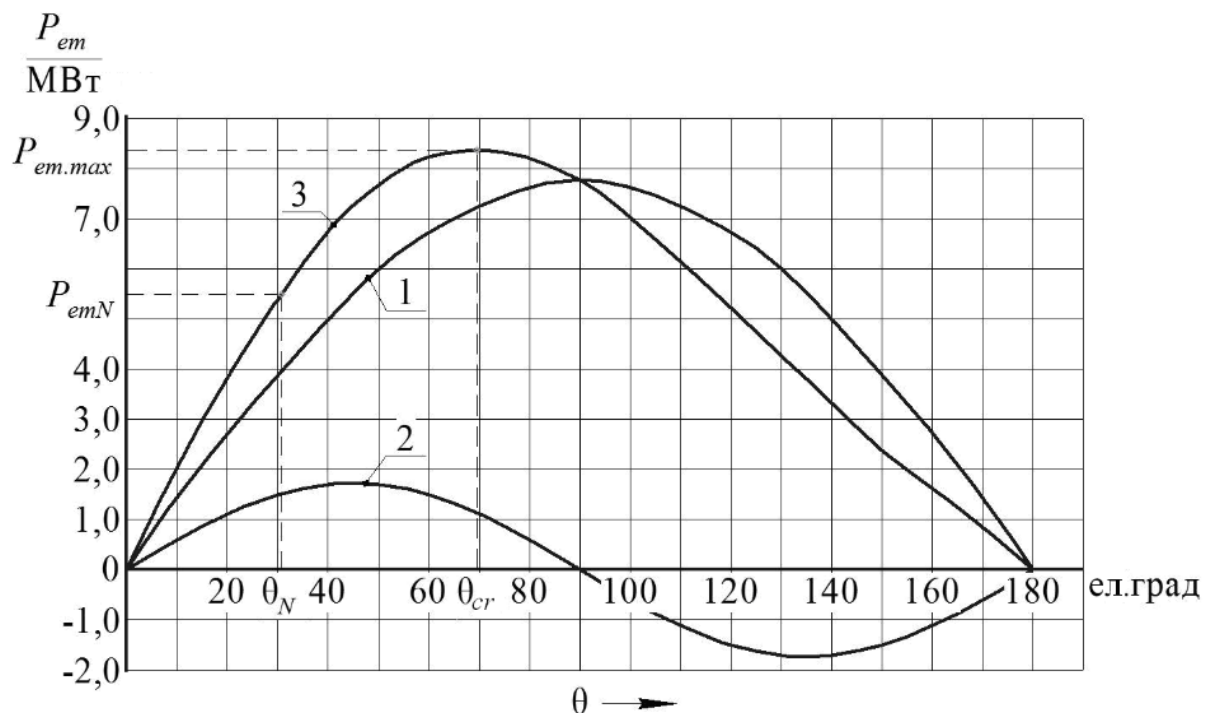


Рисунок 7 – Кутова характеристика синхронного генератора з явнополісною конструкцією ротора

Розрахуйте коефіцієнт статичного перевантаження (перевантажувальну здатність) синхронної машини

$$K_{Mm} = \frac{P_{em \max}}{P_{em N}},$$

де $P_{em N}$ – береться при θ_N .

Для генераторів, які встановлені на електростанціях, значення K_{Mm} знаходиться в межах:

- для гідрогенераторів $K_{Mm} = 1,3-1,5$;
- для турбогенераторів $K_{Mm} = 1,6-1,8$.

5 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ І АНАЛІЗ РОБОТИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

5.1 Теоретичне завдання

Опишіть принцип дії двигуна постійного струму (ДПС), вкажіть його переваги і недоліки в порівнянні з іншими типами машин. Намалюйте ескіз чотириполюсного ДПС та можливі схеми включення обмоток збудження: незалежне, паралельне, змішане та послідовне.

За наведеним нижче планом для кожного варіанта включення обмотки збудження письмово відповісти на запитання:

- в яких приводах використовують саме такі двигуни;
- як регулюють частоту обертання і здійснюють реверс двигунів;
- опишіть способи гальмування ДПС;
- вкажіть проблеми пуску ДПС і способи їх вирішення.

5.2 Методичні вказівки до виконання завдання

За схемою включення обмоток збудження двигуни постійного струму поділяються на двигуни незалежного, паралельного, змішаного і послідовного збудження (рис. 8).

У двигунах постійного струму з незалежним збудженням обмотка збудження (ОЗ) головних полюсів живиться від окремого джерела постійного струму (рис. 8, а).

У двигунах паралельного збудження обмотка збудження і обмотка якоря включені паралельно і живляться від одного джерела (рис. 8, б).

У двигунах змішаного збудження основна обмотка включена паралельно, а допоміжна – послідовно з обмоткою якоря (рис. 8, в).

У двигунах послідовного збудження обмотка збудження включена послідовно з обмоткою якоря (рис. 8, г).

Частота обертання двигунів постійного струму:

$$n = \frac{U_a - I_a R_{ak}}{C_E \cdot \Phi},$$

де U_a – напруга, яку підводять до якоря двигуна постійного струму;

Φ – магнітний потік головних полюсів;

I_a – струм якоря;

$R_{a.k}$ – сумарний опір обмоток головного кола:

$$R_{a.k} = R_a + R_{ad} + R_{comp} + f(R_W),$$

R_a – опір обмотки якоря;

R_{ad} – опір обмотки додаткових полюсів;

R_{comp} – опір компенсаційної обмотки;

$f(R_W)$ – опір обмотки збудження з урахуванням схеми її включення;

C_E – машинна постійна:

$$C_E = \frac{p \cdot N_a}{60 \cdot a},$$

p – кількість пар головних полюсів;

a – кількість пар паралельних віток обмотки якоря;

N_a – кількість активних провідників обмотки якоря.

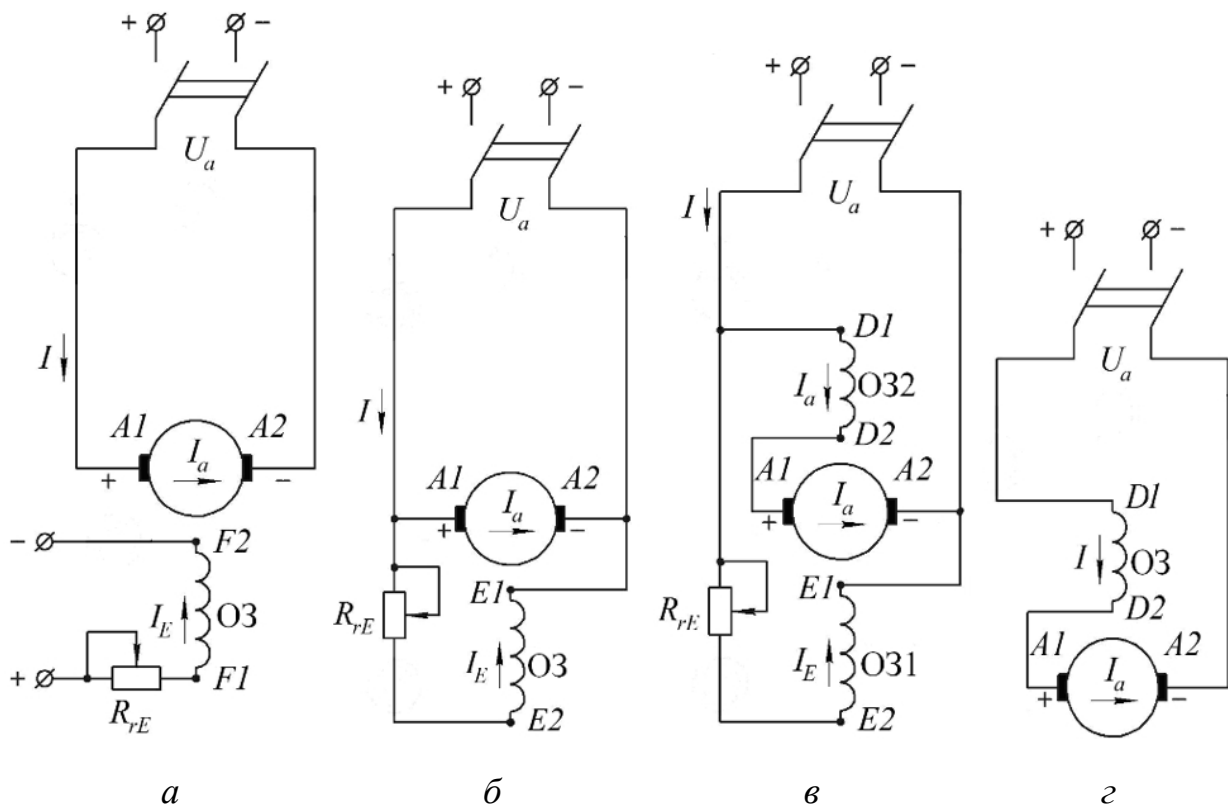


Рисунок 8 – Схеми включення обмоток збудження двигунів постійного струму:

a – з незалежним збудженням; $б$ – з паралельним збудженням;

$в$ – зі змішаним збудженням; $г$ – з послідовним збудженням

Найбільше застосування знаходять двигуни паралельного та змішаного збудження. Незалежне збудження використовується для найбільших двигунів, які, наприклад, встановлюють для приводу технологічного обладнання у чорній металургії, для шахтних підйомників, великих металоріжучих верстатів.

Двигуни з послідовним збудженням зазвичай використовують для приводів електротяги (трамвай, тролейбус, метро, залізниця).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Токарев Б.И. Электрические машины / Б.И. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 424 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1979. – 816 с.
3. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка / В.І. Міліх. – К. : Каравела, 2007. – 376 с.
4. Міліх В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка / В.І. Міліх, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І. Міліх. – К. : Каравела, 2007. – 688 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
6. Кацман М.М. Электрические машины: учебник для студ. Учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман. – 12-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
7. Міліх В.І. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин. Методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» / В.І. Міліх. – Х. : НТУ «ХПІ», 2007. – 31 с.

Приклад оформлення титульного аркуша розрахункових завдань

Міністерство освіти і науки України
 Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»

Кафедра електричних машин

РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ
 З ДИСЦИПЛІНИ
 «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

студента 3-го курсу групи _____

 (прізвище, ім'я, по-батькові студента)

Назва розділу	Дата виконання, оцінка, підпис викладача
1. Опис конструкцій та розрахунок параметрів трансформаторів в номінальному режимі	
2. Загальні питання теорії машин змінного струму	
3. Енергетична діаграма та вибір пускових реостатів асинхронного двигуна	
4. Визначення перевантажувальної здатності синхронного генератора	
5. Опис конструкції і аналіз роботи двигунів постійного струму	

Харків 20__ р.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ОПИС КОНСТРУКЦІЙ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ У НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ	4
1.1 Теоретичне завдання	4
1.2 Задача	4
1.3 Методичні вказівки до розв'язання задачі	7
2 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ	14
2.1 Задача	14
2.2 Методичні вказівки до розв'язання задачі	14
3 ЕНЕРГЕТИЧНА ДІАГРАМА ТА ВИБІР ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	18
3.1 Задачі	18
3.2 Методичні вказівки до розв'язання задач	18
4 ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	25
4.1 Теоретичне завдання	25
4.2 Задача	25
4.3 Методичні вказівки до розв'язання задачі	25
5 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ І АНАЛІЗ РОБОТИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	30
5.1 Теоретичне завдання	30
5.2 Методичні вказівки до виконання завдання	30
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	33
ДОДАТОК А Приклад оформлення титульного аркуша розрахункових завдань	34

Навчальне видання

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНСФОРМАТОРІВ І ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Контрольні запитання, розрахункові завдання
і методичні вказівки з дисципліни
«Електричні машини»
для студентів спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

за редакцією проф. Мілих В.І.

Укладачі: ШЕВЧЕНКО Валентина Володимирівна
ЮР'ЄВА Олена Юріївна
ЄГОРОВ Андрій Володимирович

Відповідальний за випуск проф. Мілих В.І.
Роботу до друку рекомендував проф. Долбня В.Т.
В авторській редакції

План 2019 р., п. 117

Підписано до друку	Формат 60x84 1/16.	Папір офсетний.
Друк – ризографія.	Гарнітура Times New Roman.	Ум. друк. арк. .
Наклад – 50 прим.	Зам. № .	Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А. М.
Свідectво серії дк №4847 від 06.05.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6
тел.+38(057)714-06-74, +38(050) 976-32-87
copi@vlavke.com.ua, <http://vlavke.com.ua>